

DISS. ETH NO. 15075

**UPPER MANTLE S-VELOCITIES AND CRUSTAL  
THICKNESS IN THE EURASIA-AFRICA PLATE  
BOUNDARY REGION DERIVED FROM REGIONAL  
SEISMOGRAMS**

A dissertation submitted to the  
**SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH**

for the degree of  
**Doctor of Natural Sciences**

presented by  
**Federica Marone**

Dipl. Natw. ETH  
born April 30, 1975  
citizen of Bellinzona (TI)

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Domenico Giardini, examiner  
Dr. Suzan van der Lee, co-examiner  
PD. Dr. Wolfgang Friederich, co-examiner

2003

# Abstract

---

The Mediterranean region is characterized by the tectonic plate boundary between the Eurasian and African plates, extending from the Azores triple junction to Turkey and the easternmost Mediterranean Sea. This plate boundary region shows unique characteristics compared to other suture zones around the world. In particular, due to the presence of several semi-independent microcontinents between the two major plates, to the irregular shape of the converging landmasses and to different converging patterns (velocity and direction) through time, the resulting tectonics and geodynamics dominating this region are highly complicated and strong lateral variations in the past and present ongoing processes are observed.

We used new seismic data to map the Moho discontinuity and to image the smooth *S*-velocity structure of the upper mantle of the Africa-Eurasia suture zone with a resolution complementary to existing studies. The used data have been recorded at 25 broad band seismic stations (MIDSEA project) temporarily deployed along the plate boundary region and at permanent seismic station networks. Following the Partitioned Waveform Inversion method, we interactively fitted the waveforms of *S*- and Rayleigh wave trains of more than 1100 seismograms. The linear constraints on upper mantle *S*-velocity and Moho depth provided by the waveform fits have been combined with independent estimates of Moho depth taken from published reflection and refraction surveys, gravity studies and receiver function analysis in a linear damped least-squares inversion for *S*-velocity and crustal thickness. This joint inversion of an unprecedented amount of data has yielded a Moho map and a 3D model for upper mantle *S*-velocities.

Strong lateral variations in the Moho topography have been observed beneath the Mediterranean Sea confirming the complex evolution of this plate boundary region. In the west, the Moho discontinuity has been found at 15-20 km depth, suggesting extended and, at least in some locations, oceanic crust. In the east the crust is on average 25-30 km thick and is interpreted either as Mesozoic oceanic or thinned Precambrian continental crust

covered by thick sedimentary deposits. Standard continental crust (30 to 35 km) is observed along the eastern part of the northern African coast, while to the west a rapid change from a relatively deep Moho (down to 42 km) below the Atlas Mountain Range to the thin crust of the southwestern Mediterranean Sea has been found. The crust beneath the eastern North Atlantic Ocean can be up to 5 km thicker compared to standard oceanic crust (6 km). Serpentinization of the sub-Moho mantle at the Mid-Atlantic ridge could contribute to the imaging of apparently anomalous deep Moho in this region. In Europe, the presence of crustal roots ( $> 45$  km) beneath the major mountain belts has been confirmed, while thin crust ( $< 25$  km) has been found beneath extensional basins.

The 3D upper mantle *S*-velocity structure shows strong correlation between the imaged heterogeneities and the tectonics and geology along the plate boundary. The upper mantle along the Eurasia-Africa suture zone is characterized by high-velocity material representing subducted oceanic lithosphere. This signature can be followed to as deep as 300-600 km, depending on the region and/or resolution. A high velocity body, possibly representing a fragment of subducted lithosphere, has been imaged beneath eastern Spain between 250 and 500 km depth. Not only convergence has been recorded in the upper mantle, but also extension has its own signature beneath the Mediterranean. This is particularly clear for the Algero-Provençal and Tyrrhenian Basins, where a shallow asthenospheric layer is observed. The lithosphere-asthenosphere system of the western Mediterranean clearly differentiates itself from the structure of the older eastern Atlantic Ocean as well as from the structure of a young (4 to 20 Ma old) ocean. These observations support the idea that, rather than a young ocean, the western Mediterranean could be a strongly stretched continent, partly affected by spreading, formed at the back of a slab. The structure characterizing the eastern Mediterranean region points to a continuation of the northern African continental lithosphere beneath the sea. Major structural differences in the eastern Atlantic Ocean are imaged between the Mid-Atlantic ridge and the older oceanic basins: the North Atlantic lithosphere is characterized by lower velocities beneath the spreading ridge than under the old ocean basins. Despite strong differences observed in the crustal structure between the Mid-Atlantic ridge and the Azores, no significant differences are observed in the upper mantle *S*-velocity structure.

Although only information provided by *S*- and Rayleigh waves has been used to derive the presented Moho depth map and upper mantle velocity model, Love waveforms have also been analysed. Discrepancy between 1D path average velocity models obtained from Love and Rayleigh waves travelling through the same region have been observed. The uppermost mantle velocity structure retrieved from Rayleigh data is consistently slower (up to 4%) than velocities obtained from Love wave data. Comparing the 1D average *S*-velocity models obtained from Love and Rayleigh waveforms with the global anisotropic model PREM (Dziewonski & Anderson, 1981), we observe a strong analogy. This suggests that the observed incompatibility between the velocity models obtained with the two types of data, at least in part, is due to radial anisotropy in the Mediterranean upper mantle. However, comparison of the results of separate 3D inversions of linear constraints ob-

tained from Love and Rayleigh data suggests that the constraints obtained by the analysis of Love waves might be more inconsistent among each other compared to the constraints in the Rayleigh dataset. Inspection of surface wave sensitivity indicates that such inconsistencies could arise from trade-offs between crustal and upper mantle velocities as well as Moho depth and uppermost mantle velocities, which have been observed to be larger for Love than Rayleigh waves. Bias of the retrieved velocity models due to path deviations with respect to the great circle is instead minimal and falls within the uncertainties for both Love and Rayleigh waves.

# Zusammenfassung

---

Das Mittelmeergebiet ist durch die Grenze zwischen der Eurasischen- und der Afrikanischen-Platte charakterisiert, welche vom Azoren-Tripel-Punkt bis hin zur Türkei verläuft. Diese Region von Plattengrenzen zeigt einzigartige Charakteristika, verglichen mit anderen Suturen. Einerseits ist das auf die zahlreichen semiunabhängigen Mikrokontinente zwischen den Hauptplatten und die unregelmässige Form der konvergierenden Landmassen zurückzuführen. Andererseits weist die Grenze zeitlich sehr unterschiedliche Konvergenzeigenschaften (in Geschwindigkeit und Richtung) auf. Die daraus resultierende Tektonik und Geodynamik ist entsprechend sehr kompliziert und durch stark lateral variierende Prozesse sowohl in der Vergangenheit wie auch in der Gegenwart gekennzeichnet.

Wir haben in unseren Untersuchungen neue seismische Daten verwendet, um die Moho-Diskontinuität zu kartieren und die *S*-Wellengeschwindigkeitsstruktur des oberen Mantels in der Afrikanisch-Eurasischen Suturen zu rekonstruieren und zwar mit einer anderen Studien komplementären Auflösung. Die Daten wurden mit Hilfe von 25 Breitband-Seismometern, welche entlang der Plattengrenze temporär installiert wurden (MIDSEA-Projekt) aufgezeichnet. Zusätzlich sind Daten von festinstallierten Geräten verwendet worden. Anschliessend haben wir mit der sogenannten Partitioned Waveform Inversion Methode die *S*- und Rayleigh-Wellenzüge von mehr als 1100 Seismogrammen interaktiv gefittet. Die so erhaltenen linearen Beziehungen zwischen der *S*-Wellengeschwindigkeit im oberen Mantel und der Moho-Tiefe sind mit unabhängigen Schätzungen der Moho-Tiefe kombiniert worden, wobei letztere aus publizierten Reflexions- und Refraktionsuntersuchungen, Gravimetriestudien und Receiver Function Analysen entnommen wurden. Anschliessend hat man mit Hilfe der kombinierten Daten eine lineare gedämpfte Inversion (least square) für die *S*-Wellengeschwindigkeit und die Krustendicke durchgeführt. Diese gemeinsame Inversion einer grossen Menge an Daten führte zu einer Moho-Karte und einem 3D Modell der *S*-Wellengeschwindigkeiten im oberen Mantel.

Wir haben starke laterale Variationen der Moho-Topographie im Mittelmeer festgestellt, was die komplexe Entwicklungsgeschichte der Plattengrenzen in dieser Gebiet bestätigt. Im Westen konnte die Moho-Diskontinuität in einer Tiefe von 15-20 km festgestellt werden, was auf eine gedehnte und, zumindest an einigen Orten auf eine ozeanische Kruste hindeutet. Im Osten dann, ist die Kruste durchschnittlich 25-30 km mächtig und kann entweder als mesozoisch-ozeanische oder verdünnte präkambrisch-kontinentale Kruste mit einer dicken Sedimentschicht interpretiert werden. Normale kontinentale Kruste (30 bis 35 km) kann man im östlichen Teil der nordafrikanischen Küste finden. Dagegen beobachtet man im Westen einen raschen Wechsel von einer relativ tiefen Moho (bis zu 42 km) unter der Atlasgebirgskette zu einer dünnen Kruste im südwestlichen Mittelmeer. Unterhalb des östlichen Nordatlantiks ist die Kruste bis zu 5 km dicker verglichen mit einer normalen ozeanischen Kruste (6 km). Diese ungewöhnlich tiefe Moho könnte man auf eine Serpentinisierung im Sub-Moho Bereich in der Region des Mittelatlantischen-Rückens zurückführen. Schliesslich konnten wir mit unserem Modell die Krustenwurzeln mit einer Dicke von mehr als 45 km unterhalb der grösseren Gebirgszüge in Europa nachweisen. Ebenso haben wir unter Extensionsbecken eine dünne Kruste von weniger als 25 km Mächtigkeit gefunden.

Die 3D *S*-Wellengeschwindigkeitsstruktur des oberen Mantels zeigt eine deutliche Korrelation zwischen den abgebildeten Heterogenitäten, der Tektonik und der Geologie entlang der Plattengrenze. In der Eurasisch-Afrikanischen Suturzone weist der obere Mantel eine Hochgeschwindigkeitszone auf, die mit subduzierter ozeanischer Lithosphäre erklärt werden kann. Die Zone ist bis in eine Tiefe von 300-600 km (in Abhängigkeit vom Ort und der Auflösung) ersichtlich. Eine weitere Zone hoher Geschwindigkeit konnte unterhalb Ostspanien, in einer Tiefe von 250 bis 500 km aufgelöst werden. Möglicherweise stellt dieser Körper ein Fragment subduzierter Lithosphäre dar. In der Mittelmeerregion wurden jedoch nicht nur Konvergenz-, sondern auch Extensionsgebiete im oberen Mantel festgestellt. Deutlich sichtbar ist dies insbesondere im Algero-Provençal und im tyrrhenischen Becken, wo oberflächennahe Asthenosphärenschichten zu sehen sind. Das Lithosphären-Asthenosphären-System im westlichen Mittelmeer unterscheidet sich nicht nur sehr deutlich vom älteren östlichen Atlantik, sondern auch von der Struktur eines jüngeren (4 bis 20 Ma alten) Ozeans. Es handelt sich sehr wahrscheinlich um einen gedehnten Kontinent (teilweise durch Spreading gekennzeichnet), welcher auf der Rückseite einer subduzierenden Platte entstanden ist. Im östlichen Mittelmeer deuten die Strukturen auf eine Fortsetzung der nördlichen afrikanischen kontinentalen Lithosphäre hin. Die grössten strukturellen Unterschiede konnten im östlichen Atlantik, zwischen dem Mittelatlantischen-Rücken und den älteren atlantischen Becken gefunden werden: unterhalb des Rückens dominieren tiefer Geschwindigkeiten als unter den ozeanischen Becken. Obschon die Krustenstruktur zwischen dem Mittelatlantischen Rücken und den Azoren starke Unterschiede aufweist, können selbige in der *S*-Wellengeschwindigkeitsstruktur des oberen Mantels nicht gefunden werden.

Ein Vergleich der durchschnittlichen 1D-Geschwindigkeitsmodelle von Love- und Ray-

leighwellen, welche durch die selben Regionen gelaufen sind, zeigt eine deutlich geringere Geschwindigkeit (rund 4%) der Rayleighwellen auf. Vergleicht man jedoch die aus den Wellenformen von Love- und Rayleighwellen gewonnen durchschnittlichen *S*-Wellengeschwindigkeiten mit jenen aus dem globalen anisotropischen Modell PREM (Dziewonski & Anderson, 1981), so stellt man eine gute Übereinstimmung fest. Daraus lässt sich schliessen, dass der Unterschied zwischen den Geschwindigkeitsmodellen aus den beiden Datensätzen (Love und Rayleigh) zumindest teilweise auf radiale Anisotropie im oberen Mantel zurückzuführen ist. Betrachtet man jedoch die Resultate der getrennten 3D-Inversion von Love- und Rayleighdaten, so scheinen die Parameter aus der Analyse der Lovewellen inkonsistenter zueinander zu sein, als jene aus den Rayleighwellen. Eine Untersuchung von Oberflächenwellen-Sensitivitäten deutet darauf hin, dass diese Inkonsistenz auf Kompromisse zwischen den Krusten- und oberen Mantelgeschwindigkeiten wie auch auf jene zwischen der Moho-Tiefe und den Geschwindigkeiten im obersten Teil des Mantels (welche für Lovewellen höher sind als für Rayleigh) zurückzuführen sind. Systematische Fehler der Geschwindigkeitsmodelle auf Grund von Abweichungen in den Laufpfaden vom Grosskreis sind dagegen klein und fallen in die Unsicherheiten von Love- und Rayleighwellen.